

# 新物理の兆候は見たか？ – 2光子共鳴状態の探索 –

東京大学 素粒子物理国際研究センター

寺師 弘二

Koji.Terashi@cern.ch

2016年(平成28年)2月9日

## 1 はじめに

LHC Run 1でのハイライトはヒッグス粒子の発見であるが、それ以外にも標準模型(SM)のより精度の高い検証や今まで見えなかったSM過程の測定など、LHC実験から得られた成果は大きい。Run 2の開始とともに重心系エネルギーを $\sqrt{s} = 13$  TeVに上げることで、LHCはエネルギーフロンティアの地平をさらに押し広げようとしている。前稿の山中氏の記事にあるように、ATLASとCMSの両実験は2015年に得られたRun 2データを使って、標準模型の測定から新粒子の探索までさまざまな物理結果を報告してきた[1, 2]。そのうちの多くは、昨年12月のCERNセミナーで大々的に報告された。その中で特に注目を集めた発表が2光子共鳴状態の探索結果[3, 4]であった。発表前からすでに注目されていたのでは?と思われるフシもあるが、それはさておき、その探索の概要と結果について紹介するのが本稿の目的である。

## 2 ATLASでの探索

セミナーで報告されたATLASの2光子共鳴の探索[3]は、(標準模型ヒッグスのような)スピン0のスカラ粒子が2光子に崩壊する信号をターゲットとしている。崩壊幅 $\Gamma$ の非常に狭い信号(Narrow Width Approximation, NWAと呼ぶ)と幅の広い信号(Large Width Approximation, LWAと呼ぶ)に対して、検出器の分解能を考慮した2光子質量 $m_{\gamma\gamma}$ 分布を記述するモデルを導入して探索を行う。NWAの幅( $\Gamma = 4$  MeV)は検出器分解能よりはるかに狭く、LWAの幅は信号質量 $m_X$ に対して $1\% < \alpha (= \Gamma/m_X) < 10\%$ の範囲で可変させる。

まず電磁カロリメータでのエネルギークラスターが光子と矛盾しないなどの条件から、 $|\eta| < 2.37$  (ただし $1.37 \leq |\eta| < 1.52$ を除く)の範囲に光子の候補を2つ含む事象を選別する。もっともTightな条件で光子を同定したのち、その光子が事象中で孤立している(光子の

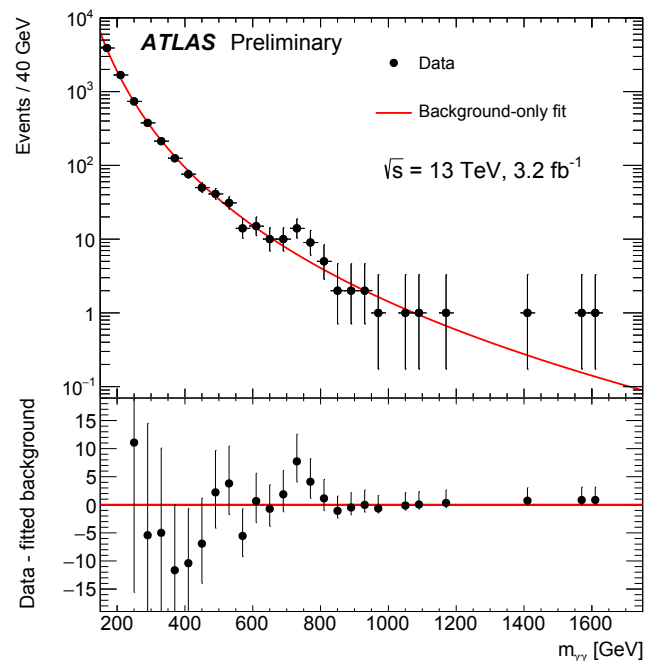


図1:  $\sqrt{s} = 13$  TeV,  $3.2 \text{ fb}^{-1}$  データを用いた ATLAS での  $m_{\gamma\gamma}$  分布。上図の実線はフィットの結果。下図はデータとフィット値との差を示す。

周辺にその他の粒子が生成されていない)ことを要求する。これらの条件により、ジェット中の $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ などの背景事象を抑制する。孤立した光子が事象中に2つ含まれ、その横方向エネルギー $E_T^{\gamma_{1,2}}$ が $E_T^{\gamma_1} > 0.4m_{\gamma\gamma}$ と $E_T^{\gamma_2} > 0.3m_{\gamma\gamma}$ を満たすことを要求する( $m_{\gamma\gamma}$ は2光子系の質量)。この条件は、スカラ粒子発見に最適化されていることに注意が必要である。ここまでの条件で選別された事象に含まれる2光子過程以外の背景事象(主に $\gamma$ +jet)は、10%以下であることが分かっている。

データに含まれる信号と背景事象は、まずそれぞれの成分を記述する関数形を決め、その確率分布を測定された $m_{\gamma\gamma}$ 分布へフィットすることで評価する。信号に対しては、正規分布を中心にその両側が冪乗で減少するような関数形(double-sided Crystal Ballと呼ばれる)を用いて、NWAとLWAの両方の信号をモデル化する。背

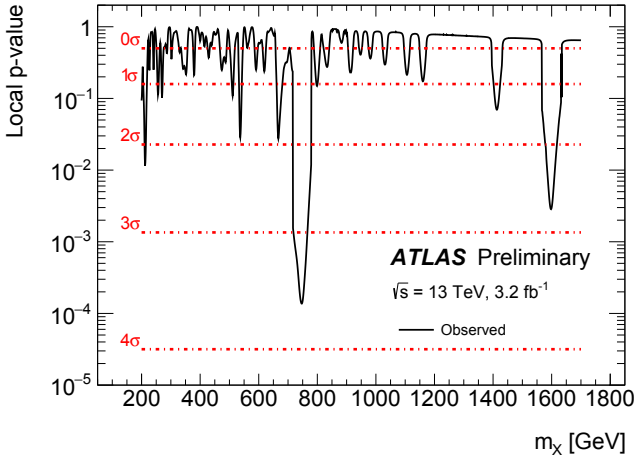


図 2:  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ,  $3.2 \text{ fb}^{-1}$  の ATLAS データに NWA 信号を仮定してフィットした場合の local  $p$  値。

景事象に対しては、bump hunting に良く使われる関数を少し変形した関数形：

$$f_k(x; b, \{a_k\}) = (1 - x^{1/3})^b x^{\sum_{j=0}^k a_j (\log x)^j} \quad (1)$$

を用いる ( $x = m_{\gamma\gamma}/\sqrt{s}$ )。この関数形の正当性は SM  $\gamma\gamma$  事象を大量にモンテカルロシミュレーションで生成することで検証した。また  $x^{\sum_{j=0}^k a_j (\log x)^j}$  項の次数  $k$  は、最低次 ( $k = 0$ ) の場合と  $k = 1, 2$  の場合のフィット結果の比較から  $k = 0$  で十分精度良くデータをフィットできることを確認した。

図 1 に背景事象のみを仮定した場合のフィット結果を示す。図 2 は、NWA 信号を含めてデータにフィットした場合、背景事象がデータと同等かそれ以上の事象の超過を示す確率 (local  $p$  値) を示す。この図から、約 750 GeV に local  $p$  値で  $3.6\sigma$ 、 $m_{\gamma\gamma}$  分布の全領域 (200-2000 GeV) でのゆらぎを考慮した global な  $p$  値で  $2.0\sigma$  の事象の超過があることが分かる。一方  $200 \text{ GeV} < m_{\gamma\gamma} < 2000 \text{ GeV}$ ,  $1\% < \alpha < 10\%$  の範囲で LWA 信号を仮定してフィットした場合、やはり約 750 GeV で最も有意な超過 (local  $p$  値で  $3.9\sigma$ , global  $p$  値で  $2.3\sigma$ ) が見られた。この時の  $\alpha$  の値は  $\alpha \simeq 6\%$  で、LWA 信号の幅は  $\Gamma \simeq 45 \text{ GeV}$  に相当する。

一方 Run 1 データと矛盾しないかどうか確認するため、Run 2 解析と同じ背景事象のモデルを使い Run 1 データの再解析も行われた。Run 1 と Run 2 の両データから NWA と LWA ( $\alpha = 6\%$ ) を仮定して信号断面積のフィット値を求め、その値が 750 GeV での  $s$ -チャンネル  $gg$  過程を想定したパートンルミノシティ比と矛盾していないかどうか検証した。その結果、両データの同等性は NWA で  $2.2\sigma$ 、LWA で  $1.4\sigma$  ということが分かった。 $gg$  ではなく  $q\bar{q}$  過程を想定した場合は、8 TeV から 13 TeV へのパートンルミノシティの増加は  $gg$  よりも小さいため、両データの同等性は下がる方向に移動する。

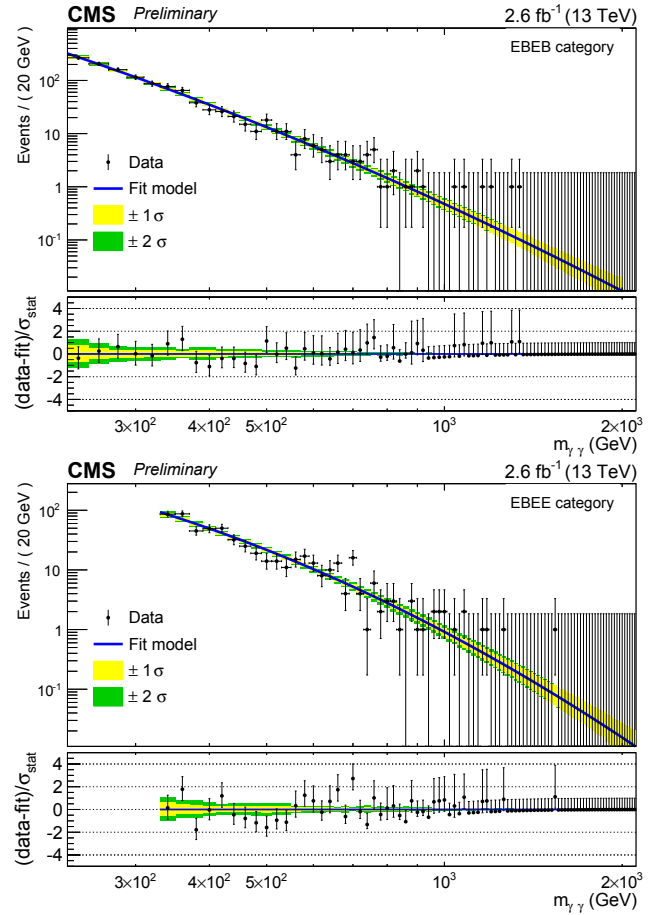


図 3:  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ,  $2.6 \text{ fb}^{-1}$  データを用いた CMS での  $m_{\gamma\gamma}$  分布。実線はフィットの結果。統計誤差に対するデータとフィット値との差の大きさを下部に示す。

### 3 CMS での探索

CMS の 2 光子共鳴の解析 [4] は、Randall-Sundrum 模型 (RS) で予想されるグラビトンターゲットにして 0.5-4.5 TeV の広い質量領域で探索を行う。グラビトンの結合の強さは  $\tilde{\kappa} = \kappa/(M_{\text{Pl}}/\sqrt{8\pi})$  ( $\kappa$  は RS 余剰次元の曲率,  $M_{\text{Pl}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$  はプランク質量) で表されるが、この探索では  $\tilde{\kappa} = 0.01$  から 0.2 の範囲を考えている。 $\tilde{\kappa} = 0.01$  は NWA,  $\tilde{\kappa} = 0.2$  は  $\alpha \sim 6\%$  の LWA にほぼ相当している。

解析では、まず横方向運動量  $p_T$  が 75 GeV 以上、 $|\eta| < 2.5$  (ただし  $1.44 \leq |\eta| < 1.57$  を除く) の光子を 2 つ含む事象を選別する。光子に対しては、カロリメータでのクラスターサイズ (奥行きも含めて) が光子と矛盾しないこと、他の粒子から孤立していること、電子が付随している場合は  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  と矛盾しないことを要求する。さらに、電磁カロリメータを  $|\eta| < 1.4$  (バレル領域, EB) と  $|\eta| > 1.57$  (エンドキャップ領域, EE) に分け、選別された事象を光子が 2 つともバレル領域で観測された場合 (EBEB) とバレルとエンドキャップで 1 つずつ観測された場合 (EBEE) にカテゴリー分けする。

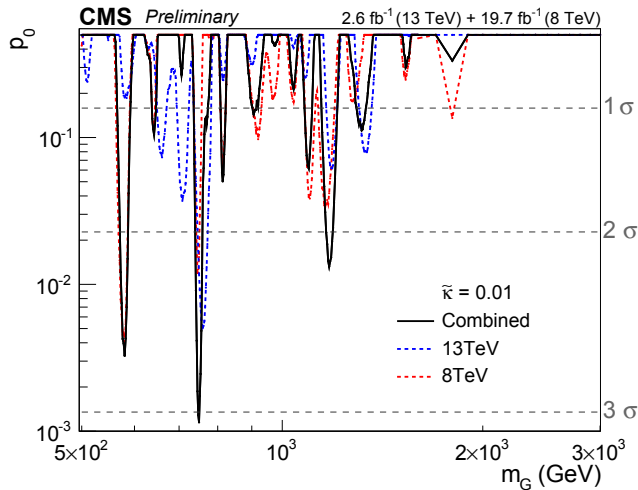


図 4: CMS データに  $\tilde{\kappa} = 0.01$  のグラビトン信号を仮定してフィットした場合の local  $p$  値。青 (赤) 点線は Run 2 (Run 1) の結果で、実線は 2 つのデータを統合した結果。

この時、光子が 2 つともエンドキャップ領域で観測された場合は考慮していないことに注意が必要である<sup>1</sup>。この条件で選別された事象に占める 2 光子事象の割合は、EBEB で約 90%、EBEE で約 80% である。

データ中の背景事象の評価は、CMS でも同様に背景事象を記述する関数形でデータに直接フィットして求めている。用いる関数は

$$f(m_{\gamma\gamma}; a, b) = m_{\gamma\gamma}^{a+b \cdot \log(m_{\gamma\gamma})} \quad (2)$$

であり、この係数  $a$ ,  $b$  はデータから直接求める (信号を含めた仮説検定でも同じ値を用いる)。

EBEB と EBEE の各カテゴリーのデータに式 (2) でフィットした結果を図 3 に示す。 $\tilde{\kappa} = 0.01$  のグラビトン信号を仮定して EBEB と EBEE のデータに同時フィットした場合、約 760 GeV で local  $p$  値が  $2.6\sigma$  の最も有意な超過を観測した。ただし  $m_{\gamma\gamma}$  分布領域の幅 (0.5-4.5 TeV) を考慮すると、global  $p$  値は約  $1.2\sigma$  以下まで下がる。 $\tilde{\kappa} = 0.2$  を仮定した場合の local  $p$  値は約  $2.0\sigma$  である。

CMS でも Run 1 データとの同等性の検証を行った。CMS での Run 1 データ解析は元々 2 通りあり、それぞれ  $m_{\gamma\gamma}$  で 150-850 GeV と  $> 500$  GeV の領域をカバーする。背景事象の評価と統計解析を Run 2 での手法に統一した上で、2 つの解析の予想感度が高い方を各質量点で採用し、Run 1 と Run 2 データに対して同時フィットを行う。信号は  $\tilde{\kappa} = 0.01$  のグラビトン信号を仮定する。Run 1 と Run 2 の各解析とそれらを統合した解析で得られる local  $p$  値を図 4 に示す。統合の結果、750 GeV に local  $p$  値で約  $3\sigma$ 、global  $p$  値で  $1.7\sigma$  以下の超過があることが分かる。

<sup>1</sup>RS グラビトンのように、カロリメータの前後方へ光子を出す事象に対するアクセプタンスは小さくなる。

## 4 まとめと考察

現在までに得られた結果をまとめると、ATLAS と CMS の両実験ともに、Run 2 データを使った探索で  $m_{\gamma\gamma} \simeq 750$  GeV 近辺に事象の超過が見られた。もちろん新粒子の“発見”を主張するにはまだほど遠いが、ほぼ同じ質量領域で超過が見られたことは面白い。また、その結果は Run 1 の探索結果と大きく矛盾しないことも分かった。

“信号”の幅の解釈については注意が必要かもしれない。CMS の結果は、 $\tilde{\kappa}$  が大きくなるにつれて超過の有意度は下がる傾向にある。一方 ATLAS の結果は、 $\alpha \simeq 6\%$  の LWA ( $\Gamma \simeq 45$  GeV) を仮定した場合に最も有意度が高い。この振る舞いの違いがどれくらい有意かについては明確な数字はまだない。ただし、NWA を仮定した 750 GeV の信号で ATLAS データにフィットした場合、光子の運動量分解能の系統誤差が元の値から約  $1.5\sigma$  程度ずれることが分かっている。このことは“信号”の幅が検出器の分解能よりも広いことを示唆しているように見えるが、統計的にはつきりと結論づけるためにはさらにデータを蓄積して解析する必要がある。

$\Gamma \simeq 45$  GeV の未知の粒子を信じるとすると、明らかに  $\gamma\gamma$  以外に崩壊するモードが存在しなければならない。前稿の山中氏の記事で紹介されているように、ジェット対 ( $gg, q\bar{q}'$ ) やレプトン対 ( $ee, \mu\mu, \tau\tau$ ) 電弱ゲージボソン対 ( $WW, ZZ$ ) など異なる終状態での探索はすでに行われているが、750 GeV 近辺に事象の超過の兆候は見られない。ただしいくつかの探索は 750 GeV という比較的“軽い”質量領域には必ずしも最適化されていないため、今後の精査が必要である。 $t\bar{t}$  や  $Z\gamma$ ,  $HH$  などまだ Run 2 では見られていないモードも存在する。さらには暗黒物質の候補粒子や、よりエキゾチックな粒子の生成・崩壊 (縮退した新粒子の複数生成、軽い新粒子を経由した“光子ジェット”への崩壊) など、さまざまな可能性が考えられる。これらの可能性のある崩壊モードを網羅した探索ができるよう、ATLAS 実験では各解析グループの横の連携を密にして最大限の努力を続けている。今後の報告に是非ご期待ください。

## 参考文献

- [1] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
- [2] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResults>
- [3] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2015-081.
- [4] CMS Collaboration, CMS-PAS-EXO-15-004.